黄土高原水分利用效率动态及其对干旱和地表温度的响应

秦格霞[1,2]， 孟治元[3]， 李 妮[4]

（1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；2. 西北大学城市与环境学院地表系统与灾害研究院，陕西 西安 710127；3. 西安东方宏业科技股份有限公司，陕西 西安 710000；4. 陕西学前师范学院经济与管理学院，陕西 西安 710100）

摘 要：黄土高原是世界上土壤侵蚀最严重和中国增绿幅度最大的地区，研究该区水分利用效率（WUE）时空演变及其与干旱和地表温度（LST）之间的关系，已成为黄土高原最大植被容纳阈值选择的重要参考。基于Theil-Sen趋势法和一阶差分相对贡献量法分析了2001—2021年黄土高原不同季节WUE时空变化规律及干旱和LST对WUE变化的贡献情况。结果表明：（1）2001—2021年黄土高原春、秋季WUE平均值小于2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}，夏季WUE平均值大于2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}。春、秋季耕地和林地区域WUE高于草地区域，夏季耕地区域WUE最低，林地区域次之，草地区域最高。（2）春、夏季WUE以稳定不变趋势为主，空间分布上均表现为"中部减少，西部和东部稳定不变"的特征，草地区域WUE下降速率>林地区域>耕地区域；秋季WUE以增加趋势为主，草地区域WUE上升速率>林地区域>耕地区域，空间分布上呈"西北增加，东南减少"的特征。（3）春、夏季LST对WUE变化为正贡献度，草地区域表现最为显著，秋季LST对草地和林地区域WUE为负贡献度，但对耕地区域WUE为正贡献度。春、秋季干旱对WUE变化为正贡献度，夏季为负贡献度。以上结果有助于认识气候变化和生态修复工程实施背景下黄土高原干旱和LST与水资源之间的关系。

关 键 词：水分利用效率；干旱；地表温度；黄土高原

文章编号：1000－6060(2024)11－1887－12(1887～1898)

黄土高原作为世界水土流失严重区和生态环境脆弱区，水资源短缺一直是其区域社会经济-生态环境可持续发展的主要限制因素。因此，我国政府为了保护环境、减少水土流失，近几十年来实施了一系列生态修复工程（表1）[1]，但有研究发现前期的部分生态修复工程缺乏科学的指导，区域植被恢复不合理（如"小树龄"），引起了蒸散耗水量急剧增加，导致土壤水分缺失、径流减少和生态系统退化等问题[2-4]，反而加剧了黄土高原水资源短缺问题。也有研究发现黄土高原部分地区的植被覆盖度已达到区域环境的最大承载能力，植被覆盖度持续增加并不会使区域植被恢复力增加[4]。生态系统水分利用效率（WUE）被定义为"植被生产力"与"耗水量"的比率，是指植物消耗单位质量水分所固定CO_2或生产干物质的量，是反映水对植被生产力和碳封存能力的限制情况[5]。探究黄土高原WUE的时空演变及其驱动因子是了解区域碳-水相互作用及其对环境条件响应的关键，对优化区域水资源管理及生态环境的健康发展至关重要，对黄土高原生态恢复工程的可持续性评估意义重大。

黄土高原植被WUE的变化受到很多非生物和生物因素的共同控制，特别是气候条件、植被覆盖情况和人类干预强度等[6-7]。如Zheng等[5]研究发现黄土高原湿润地区WUE具有较高值，除极寒地区

收稿日期：2023-12-19； **修订日期：**2024-01-25
基金项目：陕西省自然科学基础研究计划资助项目（2022JQ-274）资助
作者简介：秦格霞（1995-），女，博士研究生，主要从事干旱区植被恢复、冰冻圈与全球气候变化等方面的研究.
E-mail: qingexia2021@163.com
通讯作者：李妮（1984-），女，在读博士，副教授，主要从事生态水文与干旱区植被恢复等方面的研究. E-mail: lini_2004@163.com

表1 新中国成立以来黄土高原实施的重点生态修复工程

Tab. 1 Key ecological restoration projects in the Yellow River Basin since the founding of the People's Republic of China

生态问题	实施的生态工程	实施期限	涉及区域
水土流失	水土保持工程	1949年至今	黄河流域全域
林草退化	三北防护林体系建设工程	1978年至今	青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西
林草退化	天然林资源保护工程	1998—2020年	陕西、甘肃、青海、宁夏、内蒙古、河南、山西
林草退化	退耕还林还草	1999至今	黄河流域全域
土地沙化	京津唐风沙源治理工程	2000—2022年	陕西、山西、内蒙古
矿山破坏	废弃矿山治理工程	2005年至今	甘南黄河上游、内蒙古矿山、河南黄河三门峡段
湿地萎缩	湿地保护与修复工程	2006年至今	山东黄河河口、若尔盖湿地、黄河三角洲湿地
系统治理	山水林田湖草生态保护修复工程	2016至今	黄土高原、黄河三角洲、黄河中上游

外，WUE与降水呈正相关性，但相关性会随着气温升高而逐渐降低，其次随着植被覆盖度增加WUE也呈现出增加趋势；刘宪锋等[8]也发现黄土高原不同植被生态系统WUE均值和趋势存在显著差异，且降水量、日照时数和相对湿度是导致WUE变化的主要气候因子，生态修复工程实施也显著提高了植被生态系统WUE，是近年来黄土高原WUE变化的主要驱动因素；张良侠等[9]同样也表明气候变化和土地利用/覆被变化均会显著改变区域WUE；但陈凌伟等[10]发现黄河流域WUE变化主要受到干旱、风速负影响较大，而太阳辐射对WUE影响不显著。不同学者对黄土高原WUE变化的驱动因子结论存在差异，有研究指出是因为气候变暖的同时，降水时空分布格局、蒸散发（ET）也发生了较大变化。其次，变暖引起的干旱加剧也可能导致植被生产力下降，增加了大气用水需求，导致WUE发生了变化，但不同土地覆被区域WUE对气候的响应程度不同[11-15]。如Yang等[15]发现随着气候暖干化，干旱和半干旱/半湿润生态系统的不同生物群落WUE对水文气候条件呈不同敏感性，因此对干旱有不同的响应，且不同的生物群落中最干旱年往往存在一个最大的生态系统WUE，主要是因为干旱影响碳汇，使WUE发生变化[16-17]。其次，也有学者发现小雨事件并不一定会引起WUE发生变化，主要是因为小雨事件降雨量较少，很难渗入地下补充植被深处水分，而地表浅层土壤水分易蒸发，导致WUE对小雨事件的敏感性并不高[18]。目前，虽已有很多对黄土高原WUE时空动态及驱动因素的研究，但关于WUE变化成因仍存在较大争议[10-15]。其次，关于气候变化对黄土高原WUE变化及其驱动力的研究大部分是以年为尺度进行分析，很少有研究探讨不同季节、不同土地利用/覆被区域植被WUE时空动态及其对干旱和地表温度（LST）的响应[8-10]。再者，随着生态修复工程的实施，黄土高原的WUE动态监测一直是一项长期性重要监测任务之一，仍需要时刻关注。

鉴于此，本文基于Google Earth Engine（GEE）平台提供的MODIS数据获取了2001—2021年1 km分辨率的黄土高原的WUE和LST数据，基于气象数据计算得到了标准化降水蒸散发指数（SPEI）用于反应黄土高原干旱，并利用Theil-Sen趋势法和一阶差分相对贡献法分析了2001—2021年黄土高原不同季节、不同土地利用区域WUE空间分布特征、变化趋势及干旱和LST对WUE变化的贡献情况，从而更好厘清黄土高原季节性陆地碳-水相互作用的潜在机制和陆地生态系统的动态变化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原（34.7°~41.3°N，100.8°~114.6°E）地处中国西北部，总面积达6.49×10^5 km^2，地跨青海省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省和河南省，主要由山西高原、陕甘晋高原、陇中高原、鄂尔多斯高原和河套平原组成。该区域属于温带大陆性季风气候，降雨多集中在夏季（6—8月），多暴雨，受纬度、经度和地形的共同影响呈现出明显的西北—东南降水梯度；年均气温为3.6~14.3 ℃，具有冬季严寒、夏季暖热的特点，气温年较差和日较差大。土壤类型为质地疏松的黄土，具有湿陷性，经人为扰动后，极易发生风力和水力侵蚀。植被类型受降水空间模式的影响，从东南到西北分布着森林、森林草原、草原、沙漠草原和沙漠。黄土高原因其特殊的地理位置、地形条件、气候及不合理的人为开垦利用，水资源短缺一直是其经济发展过程中面临的重要问题之一[1-2]（图1）。

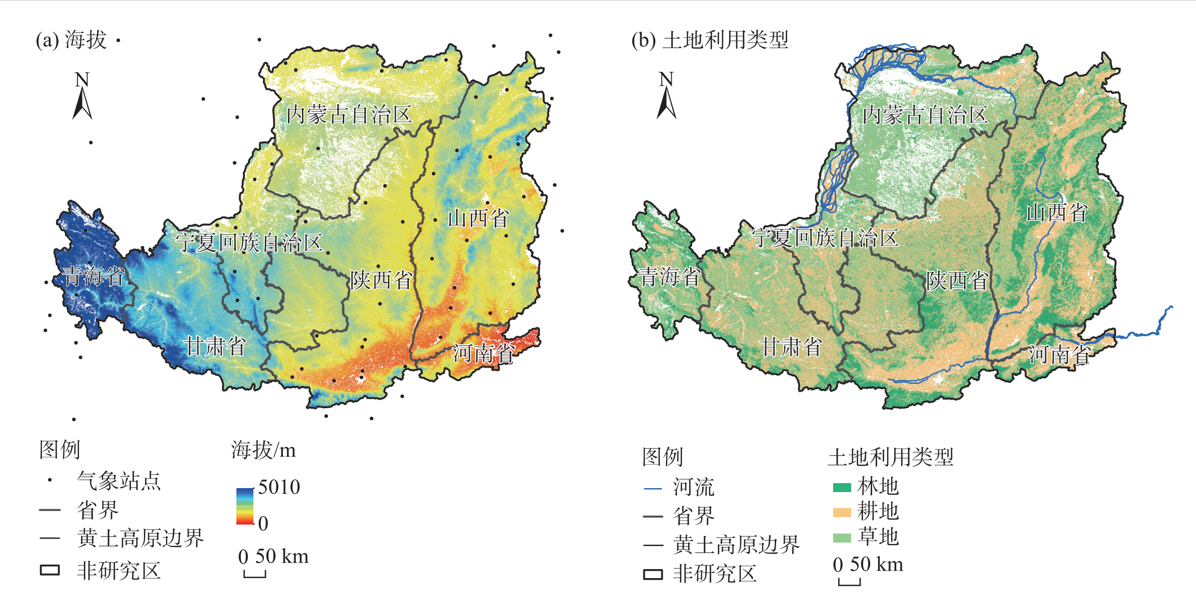


图1　黄土高原海拔及土地利用类型空间分布

Fig. 1　Spatial distributions of altitude and land use types on the Loess Plateau

1.2　数据来源

总初级生产力(GPP)、ET、LST数据来源于美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的MODIS产品(MOD17A2、MOD16A2、MOD11A2)，时间跨度为2001—2021年。GPP产品是基于辐射使用效率计算获得，时空分辨率为8 d、500 m。ET数据是利用土地覆盖、叶面积指数、光合有效辐射比值、反照率以及MERRA GMAO的气象再分析数据基于Penman-Monteith模型计算的ET，时空分辨率为8 d、500 m。LST数据是以开尔文为单位提供的LST信息，时空分辨率为16 d、1000 m。已有多数学者对MOD17A2、MOD16A2、MOD11A2产品进行了验证，发现虽然这些产品在某些地区存在高估或低估现象，但其精度能够满足大尺度研究的需求[19-20]。本文采用了最大合成法进一步消除了云和大气干扰等原因造成的异常值。

土地利用数据来源于杨杰和黄昕教授团队基于GEE上所有可获得的Landsat数据，通过随机森林分类器得到的CLCD(China land cover dataset)数据集。CLCD的总体准确率达80%，耕地分类精度达到85%以上，其他土地利用类型平均分类精度达到75%以上[21]。

气象数据来源于国家气象科学数据中心网站(https://data.cma.cn/data/index.html)提供的2001—2021年的逐月格点降水和气温数据，降水和气温数据用于提取SPEI，具体计算方法参考相关文献[22]，用3个月尺度和12个月尺度的SPEI分别反映干旱的季节性。基于ANUSPLIN软件将每月的SPEI插值为1 km分辨率的网格数据。本文中，3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季。

1.3　研究方法

1.3.1　WUE计算　WUE由GPP(g C·m^{-2})和ET(mm)的比值计算得到，单位为g C·m^{-2}·mm^{-1}[7]。

1.3.2　趋势分析　Theil-Sen斜率法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法，对测量误差和离群数据不敏感，本文采用Theil-Sen斜率法分析2001—2021年黄土高原春、夏、秋季WUE在整体变化趋势，并通过Mann-Kendall统计检验法对变化趋势的显著性进行检验[23]。具体公式如下：

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (1)$$

式中：β为像元WUE变化趋势；x_i和x_j分别为第i和j时间序列WUE的值。$\beta>0$时，表示WUE呈增加趋势；$\beta<0$时，表示WUE呈减小趋势。

1.3.3　一阶差分相对贡献量法　一阶差分相对贡献量法是指通过计算一阶差分来量化某一因素或某一组合的相对贡献，可以建立LST、SPEI和WUE的去趋势关系，因为它可以减少LST和SPEI造成的其他影响导致的WUE长期趋势的变化[18]。因此，采用一阶差分相对贡献量法量化LST和SPEI对WUE变化的贡献度。首先，需要建立LST、SPEI和WUE的回归模型，公式如下：

$$Y = T \times i + B \tag{2}$$

式中：Y为WUE、LST或SPEI；T为WUE、LST或SPEI回归模型的斜率；i为年份；B为WUE、LST或SPEI回归模型的截距。

为了将LST和SPEI对WUE变化的单独影响和综合影响区分开来，计算了WUE和LST、SPEI序列数据的第一差值（$\Delta Y = Y_{i+1} - Y_i$，其中Y为WUE、LST或SPEI，第一个差值是第i年和第i+1年连续2 a之间的绝对差值），指示WUE、LST或SPEI的逐年变化[18]，随后将其用于回归模型以估计WUE对LST或SPEI的响应。建立的多元回归模型公式如下：

$$\Delta W = T_l \times \Delta L + T_s \times \Delta S + I \tag{3}$$

式中：ΔW为WUE的第一个差值；ΔL为LST的第一个差值；ΔS为SPEI的第一个差值；T_l和T_s为LST和SPEI各自对WUE的贡献度；I为回归模型的截距。

LST和SPEI两者总体对WUE变化的贡献度计算公式如下：

$$T_b = P_l \times T_l + P_s \times T_s \tag{4}$$

式中：T_b为SPEI和LST两者总体对WUE变化的贡献度；P_l和P_s分别为LST和SPEI回归模型的斜率。

相对贡献度计算公式如下：

$$RC_l = \frac{P_l \times T_l}{P_l \times T_l + P_s \times T_s} \times 100\% \tag{5}$$

$$RC_s = \frac{P_s \times T_s}{P_l \times T_l + P_s \times T_s} \times 100\% \tag{6}$$

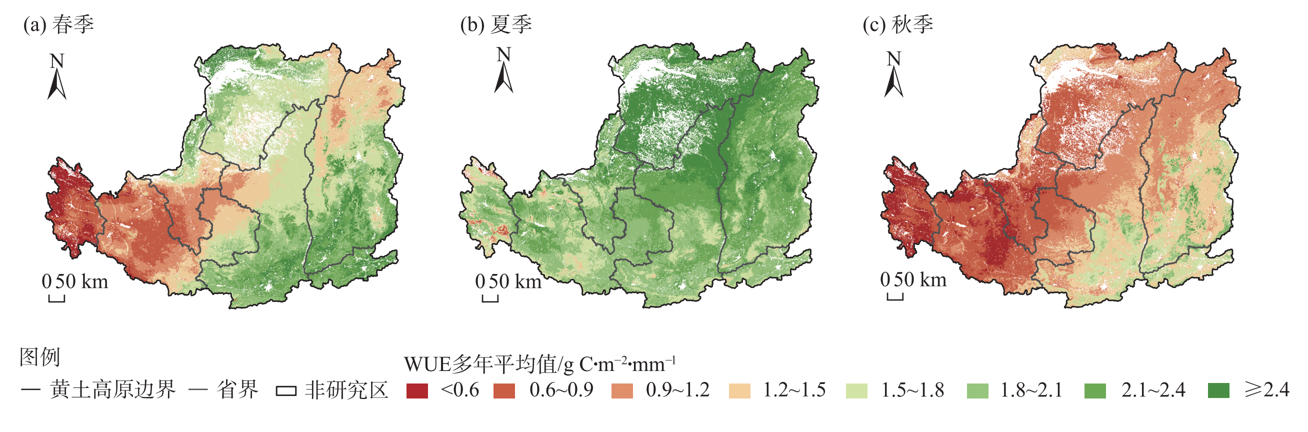
式中：RC_l为LST对WUE的相对贡献度；RC_s为SPEI对WUE的相对贡献度。

2 结果与分析

2.1 黄土高原WUE空间变化特征

2001—2021年黄土高原春、夏、秋季WUE空间变化模式如图2所示。春季WUE多年平均值呈“西北、东南高，西南、东北低”的空间分布特征；WUE高值区主要分布在河南省、山西省、陕西省南部和内蒙古自治区北部，WUE多年平均值高于1.8 g C·m^{-2}·mm^{-1}，土地利用类型主要为耕地和林地；WUE低值区主要分布在青海省、甘肃省西部、宁夏回族自治区南部和陕西省西部，WUE多年平均值低于1.2 g C·m^{-2}·mm^{-1}，土地利用类型主要为草地。夏季WUE多年平均值呈“北高南低”的空间分布特征，WUE多年平均值高于春、秋季，除青海省北部和南部地区零星分布有WUE多年平均值低于1.5 g C·m^{-2}·mm^{-1}，其他地区WUE多年平均值均高于1.5 g C·m^{-2}·mm^{-1}。秋季WUE多年平均值呈“西北高、东南低”的空间分布特征，WUE多年平均值为3个季节中最低；WUE高值区主要分布在河南省、山西省和陕西省南部，WUE多年平均值高于1.5 g C·m^{-2}·mm^{-1}；WUE低值区主要分布在青海省、甘肃省和宁夏回族自治区南部，WUE多年平均值低于0.9 g C·m^{-2}·mm^{-1}。

不同土地利用区域WUE多年平均值统计数据如图3所示。不同土地利用区域夏季WUE多年平均值均高于2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}，秋季WUE多年平均值均低于1.5 g C·m^{-2}·mm^{-1}，春季WUE多年平均值介于1.4~2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}之间。其中，草地区域春、秋WUE多年平均值低于林地和耕地区域，夏季高于林地和耕地区域；耕地区域WUE多年平均值在



注：WUE为水分利用效率。下同。

图2 春、夏、秋季WUE多年平均值空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of multi-year average values of WUE in spring, summer, and autumn

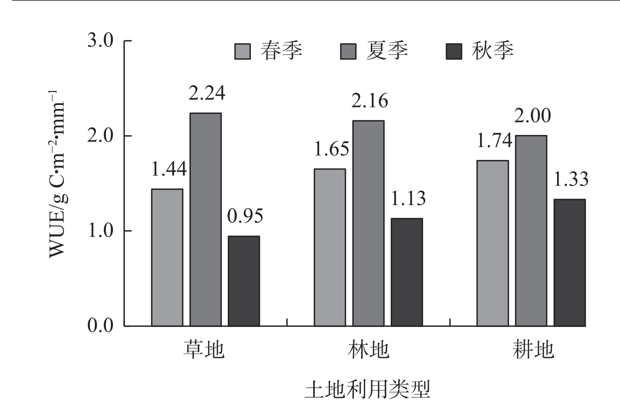


图3　春、夏、秋季不同土地利用类型区WUE多年平均值

Fig. 3　Multi-year average values of WUE for different land use types in spring, summer, and autumn

春、秋季高于草地和林地区域，夏季低于草地和林地区域。耕地区域由于受人为灌溉与技术培育的影响，导致春、秋季GPP显著增加，因此春、秋季WUE多年均值最高，夏季气温升高，GPP增加的同时ET也显著增加，从而导致WUE处于较低值。草地分布区域一般较为干旱（尤其在内蒙古自治区），春、秋季GPP和ET均较低，因此春、秋季WUE也较低，但夏季随着气温升高，草地植被为了应对干旱的气候环境，会通过提高WUE来应对恶劣的气候条件。林地区域气候环境相对湿润，具有较高的GPP和ET，随着气温升高，ET也会显著增加，因此导致夏季WUE多年平均值较春季低。

2.2　黄土高原WUE变化趋势特征

2001—2021年黄土高原春、夏、秋季WUE变化趋势如图4所示。春季WUE整体呈稳定不变趋势（60.7%），呈减少趋势的面积占比（39.09%）显著大于呈增加趋势的面积占比（0.21%）。其中，WUE呈轻微减少趋势的面积占比为37.70%，集中在内蒙古自治区西部、甘肃省东部、山西省南部和东部以及陕西省，WUE呈显著减少的面积占比仅为1.41%，零星分布在内蒙古自治区北部。WUE呈增加趋势的像元零星分布在山西省、内蒙古自治区北部。从春季不同土地利用类型年均序列WUE趋势而言，不同土地利用类型区域春季WUE趋势均为负值，且草地区域WUE下降速率（0.0219 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）>林地区域（0.0189 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）>耕地区域（0.0152 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）（图4a~b）。

夏季WUE整体以稳定不变趋势为主（58.07%），呈减少趋势的面积占比（41.86%）显著大于呈增加趋势的面积占比（0.07%），空间分布上表现为“中部减少，西部和东部稳定不变”的分布特征。其中，WUE呈减少趋势的区域分区与春季一致，但在内蒙古自治区西部和宁夏回族自治区北部WUE变化由春季的轻微减小转变为显著减小趋势。WUE呈增加趋势的零星分布在山西省和陕西省南部。从夏季不同土地利用类型年均序列WUE趋势而言，不同土地类型覆盖区域WUE趋势仍为负值，且草地区域WUE下降速率（0.0613 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）>林地区域（0.0542 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）>耕地区域（0.0432 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}），下降速率高于春季。但在2002年WUE突然在所有土地类型覆盖区域均突然增高，2003年后WUE基本呈稳定状态（图4c~d）。

秋季WUE整体以增加趋势为主（52.41%），呈稳定不变趋势和呈减小趋势的面积占比分别为22.54%和25.05%，空间分布上呈“西北增加、东南减少”的分布特征。其中，WUE变化呈减小趋势的区域集中在山西省东部、甘肃省东南部、陕西省南部和河南省，其他区域WUE变化呈增加趋势。从秋季不同土地利用类型年均序列WUE趋势来看，不同土地类型区域WUE均呈缓慢上升趋势，且草地区域WUE上升速率（0.0059 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）>林地区域（0.0047 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）>耕地区域（0.0004 g C·m^{-2}·mm^{-1}·a^{-1}）（图4e~f）。

2.3　LST和SPEI对WUE变化的贡献度

LST和SPEI的波动对植被生长及WUE具有显著控制作用，为此本文基于一阶差分相对贡献量法量化了2001—2021年春、夏、秋季LST和SPEI变化对WUE变化的贡献度，结果如图5、表2所示。春季LST对WUE以正贡献度为主，呈正贡献度的面积占比（78.84%）大约是呈负贡献度的面积占比（21.16%）的3.7倍，其中呈负贡献度的区域集中分布在青海省、甘肃省、河南省、陕西省南部和山西省东部地区，呈正贡献度的区域主要分布在内蒙古自治区和宁夏回族自治区北部。春季SPEI对WUE以负贡献度为主，且SPEI对WUE的贡献度高于LST对WUE的贡献度（由于SPEI值越小，干旱程度越严重，SPEI对WUE为负贡献度，表明干旱程度增加会使春季WUE增加），呈负贡献度的面积占比（73.38%）大约是呈正贡献度面积占比的2.8倍（26.62%）。其中，SPEI对WUE为正贡献度的区域主要分布在内蒙古自治区南部、宁夏回族自治区北

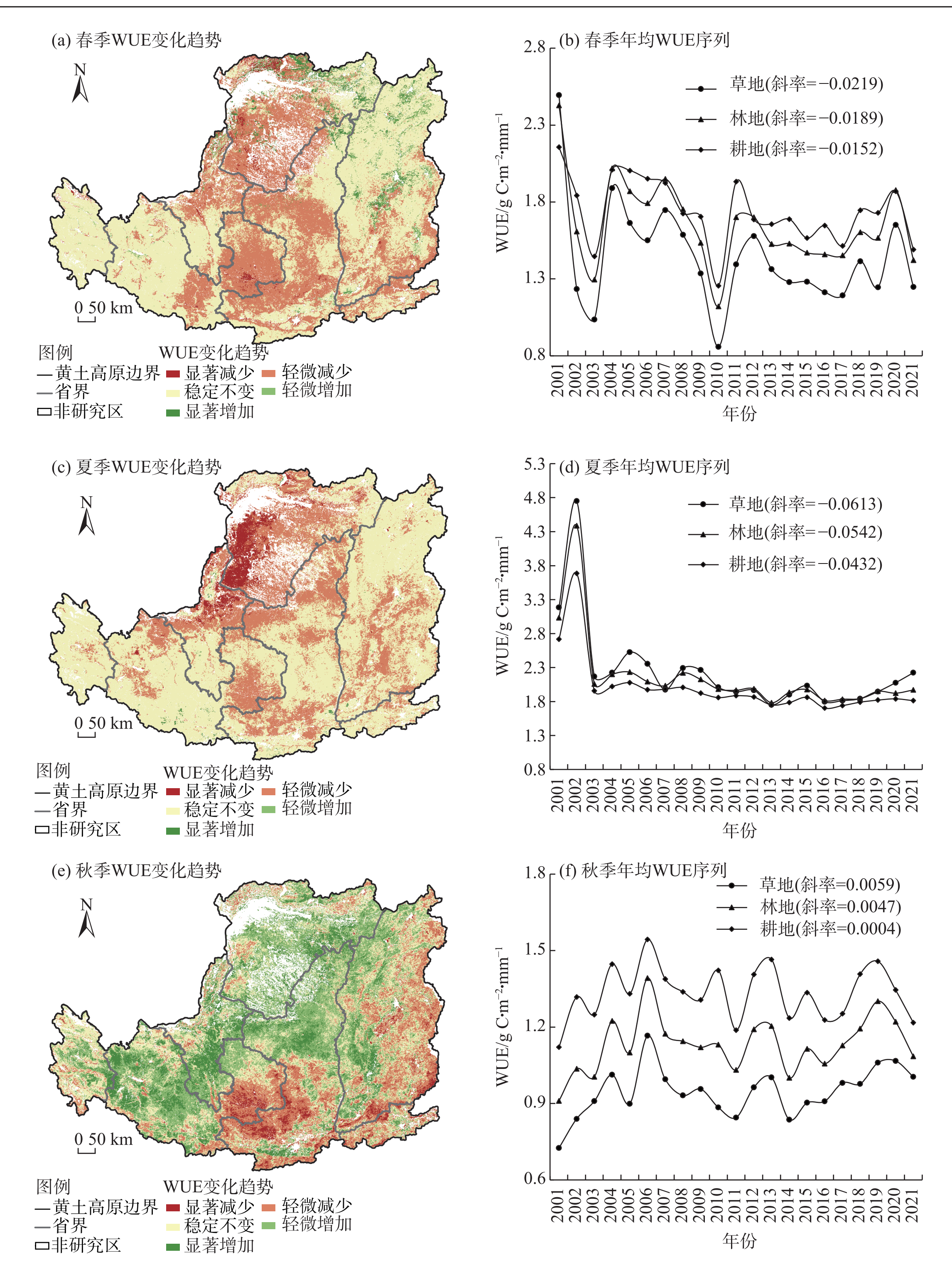
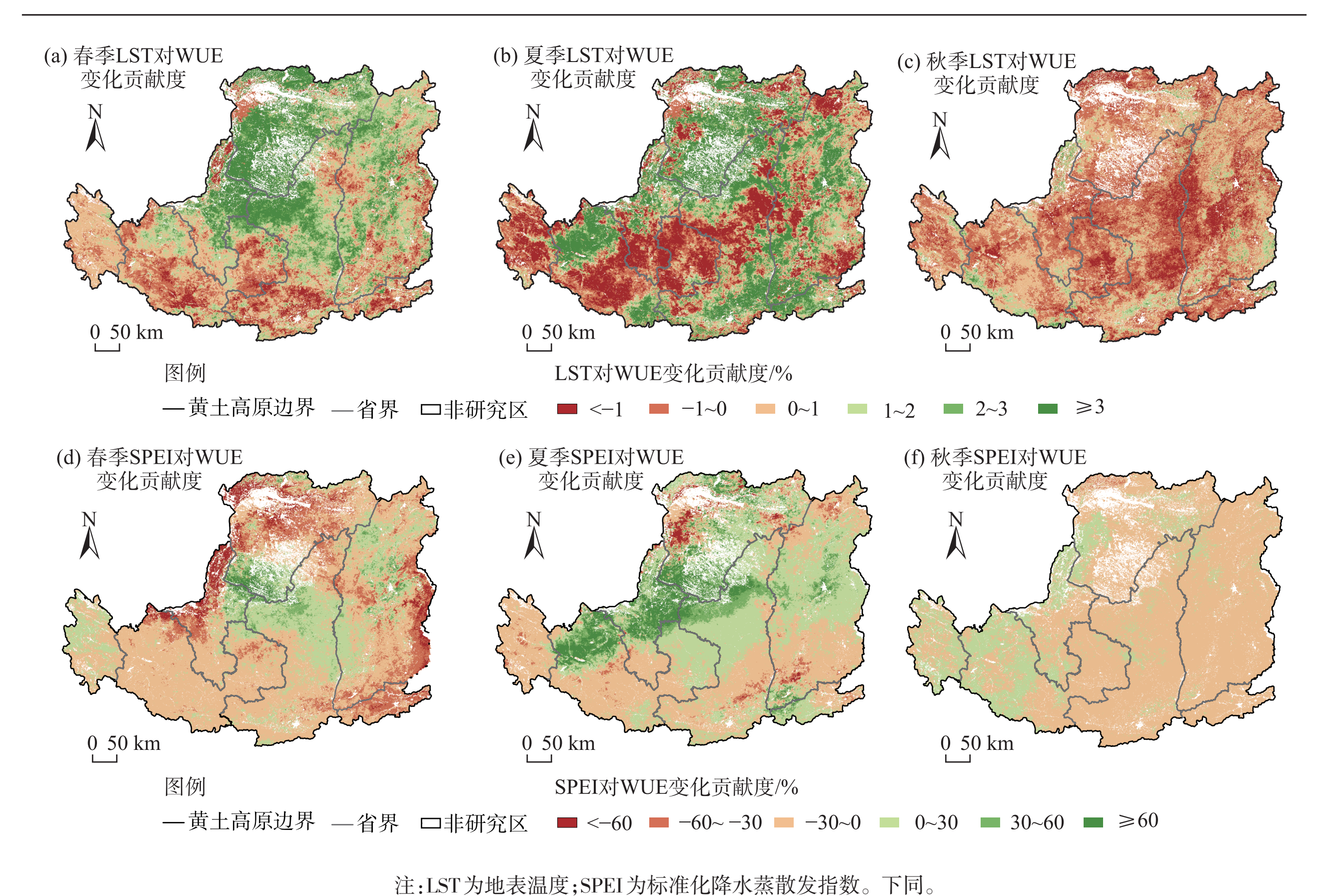


图4 春、夏、秋季WUE变化趋势分布和时间序列

Fig. 4 Change trend distributions and time series of WUE in spring, summer, and autumn

部、山西省北部和陕西省中部。夏季LST对WUE仍以正贡献度为主，但在青海省、甘肃省、山西省、宁夏回族自治区和陕西省南部均以负贡献度为主(占38.01%)，且LST对WUE的贡献度大于春季。夏季SPEI对WUE整体表现为正贡献度，但呈正贡献度和呈负贡献度的面积相当，占比分别为53.28%和46.72%，且空间分布上表现为黄土高原北部为正贡献度、南部为负贡献度的分布特征。秋季LST对WUE以负贡献度为主(占比55.56%)，但呈正贡献度的面积占比(44.44%)与呈负贡献度的面积占比相



注：LST为地表温度；SPEI为标准化降水蒸散发指数。下同。

图5　春、夏、秋季LST和SPEI对WUE变化的贡献度分布

Fig. 5　Contribution distributions of LST and SPEI to the variation of WUE in spring, summer, and autumn

表2　春、夏、秋季LST和SPEI对WUE变化的贡献度

Tab. 2　Contributions of LST and SPEI to the variation of WUE in spring, summer, and autumn　/%

季节	LST对WUE变化贡献度面积占比						SPEI对WUE变化贡献度面积占比					
	<-1%	-1%~0	0~1%	1%~2%	2%~3%	≥3%	<-60%	-60%~-30%	-30%~0	0~30%	30%~60%	≥60%
春季	5.28	15.88	27.84	20.92	13.14	16.94	4.44	13.81	55.13	21.74	3.58	1.30
夏季	21.48	16.53	15.34	12.58	10.07	24.00	1.14	3.14	42.44	35.13	10.18	7.97
秋季	13.58	41.98	35.68	7.35	1.18	0.23	0.01	0.33	79.91	19.70	0.05	0.00

当，其中呈负贡献度的区域主要分布在陕西省、山西省、内蒙古自治区中部和宁夏回族自治区南部地区。SPEI对WUE主要以负贡献度为主（80.25%），呈正贡献度的区域主要集中在青海省、甘肃省北部、宁夏回族自治区北部和内蒙古自治区西部。

LST和SPEI总体对WUE变化的贡献度如图6、表3所示，结果表明，春、秋季LST和SPEI总体对WUE变化的贡献度较低，夏季较高。其中，春季LST和SPEI总体对WUE变化主要以正贡献为主（59.45%），且空间分布上整体呈黄土高原北部为正贡献度、南部为负贡献度的分布特征，正贡献度大于40%的区域仅占6.65%，集中在河套平原北部和山西北部。负贡献度的面积占比为40.55%，但负贡献度大于40%的区域仅占9.33%，零星分布在甘肃省南部、陕西省以及山西省的南部和中部。夏季LST和SPEI总体对WUE变化的正贡献度和负贡献度的面积占比分别为47.69%和52.31%，但负贡献度超过40%的区域仅占5.87%，零星分布在青海省、甘肃省以及陕西省南部和北部地区，正贡献度大于40%的区域仅占0.38%。秋季LST和SPEI总体对WUE变化以正贡献度为主（62.87%），正贡献度超过40%的区域占29.20%，集中分布在河南省、宁夏回族自治区、山西省、陕西省南部和中部以及甘肃省东部和南部地区。呈负贡献度的面积占比为37.13%，主要分布

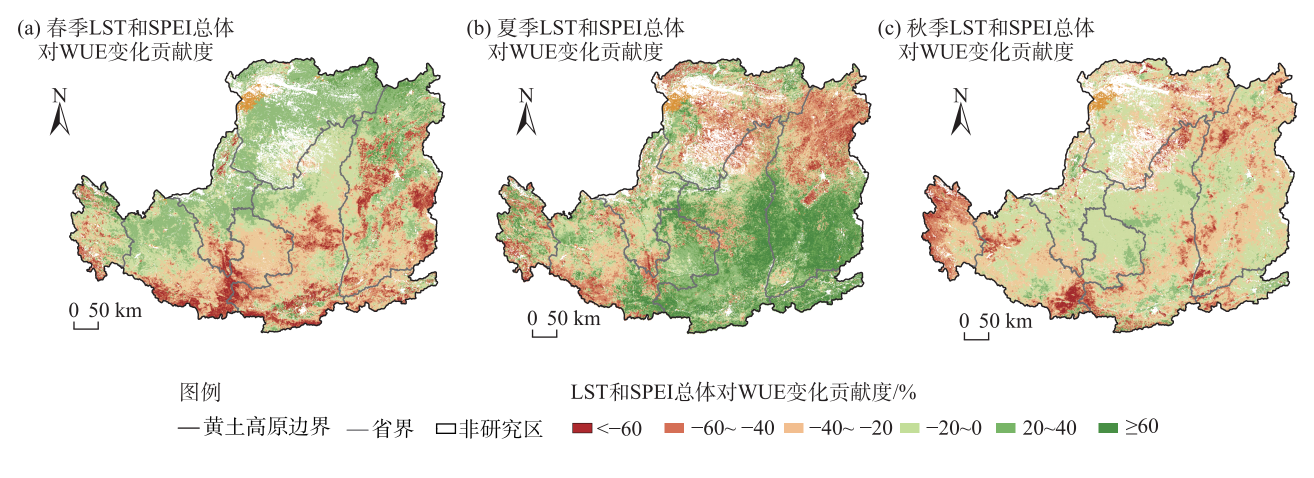


图6 春、夏、秋季LST和SPEI总体对WUE的贡献度分布

Fig. 6 Distributions of the overall contributions of LST and SPEI to WUE in spring, summer and autumn

表3 春、夏、秋季LST和SPEI总体对WUE的贡献度

Tab. 3 Overall contributions of LST and SPEI to WUE in spring, summer and autumn /%

季节	LST和SPEI总体对WUE变化贡献度面积占比							
	<-60%	-60%~-40%	-40%~-20%	-20%~0	0~20%	20%~40%	40%~60%	≥60%
春季	4.75	4.58	9.43	21.79	25.83	26.97	3.32	3.33
夏季	2.12	3.75	10.61	35.83	42.33	4.99	0.29	0.08
秋季	3.01	4.52	12.27	17.33	16.75	16.92	13.99	15.21

在山西省、陕西省和内蒙古自治区北部地区。

2.4 不同土地利用类型区LST和SPEI对WUE变化的贡献度

不同土地利用区域SPEI和LST对WUE的贡献度见表4，结果表明LST除在秋季对草地和林地区域WUE变化为负贡献度，在其他季节对3种土地利用区域WUE变化均为正贡献度，但对草地区域的正贡献度大于林地和耕地区域。春、秋季SPEI对3种土地利用区域WUE均为负贡献度，且夏季均为正贡献度，这表明春、秋季干旱程度增加会导致WUE增加，而夏季干旱程度增加会使WUE减小。其中，春、夏季SPEI变化对草地区域的WUE变化的贡献度显著大于秋季，春季SPEI变化对林地和耕地区域WUE变化的贡献度显著大于夏、秋季。夏季LST和SPEI总体对WUE变化的均以负贡献度为主，秋季均以正贡献度为主，春季在草地和林地区域为正贡献度，但在耕地区域为负贡献度。

3 讨 论

3.1 WUE时空变化分析

为了解决黄土高原生态环境问题，1999年国家率先在此实施了退耕还林(草)工程，区域植被覆盖度显著增加，固碳能力不断增强，生态环境得到了显著改善[24-25]。然而有研究结果发现，现有的人工植被覆盖度已经接近了区域土壤水分最大承受力，提高区域WUE有可能增大区域容纳植被的最大阈值[4-5]。因此，本文通过对2001—2021年黄土高原春、夏、秋季WUE时空演变特征进行分析，发现近21 a间春、秋季黄土高原不同土地利用区域WUE平均值均

表4 不同土地利用类型区域春、夏、秋季LST和SPEI对WUE的贡献度

Tab. 4 Contributions of LST and SPEI to WUE in spring, summer and autumn in different land use types /%

贡献度	草地			林地			耕地		
	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季
LST对WUE的贡献度	1.28	1.39	-0.13	0.99	1.08	-0.15	1.13	0.90	0.01
SPEI对WUE的贡献度	-17.33	22.59	-5.50	-24.26	10.59	-7.84	-22.26	2.44	-7.63
LST和SPEI总体对WUE的贡献度	6.80	-5.09	10.82	1.93	-2.12	20.31	-11.60	-5.83	18.92

小于2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}，夏季整个区域WUE平均值稍大于2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}。有学者基于MODIS数据发现全球WUE变化范围集中在0.5~6.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}[15]，相较全球WUE，黄土高原不同季节WUE平均值较低。但不同季节、不同土地利用区域WUE变化存在显著的时空异质性。如春、秋季在较为湿润的耕地和林地区域WUE明显高于草地区域WUE，夏季耕地区域WUE最低，林地次之，草地最高。这说明在蒸发量很大的夏季，碳固定量较低的草地反而能够通过改变水分利用策略、提高WUE来适应环境，相反，碳固定量较高的林地和耕地WUE则较差[8]。许多研究也指出不同生物群落的用水策略和植被根系特征存在差异[26]，如林地的根系深度较深，因此具有较高WUE，但草地在任何降水梯度下对地表土壤水分的利用程度高于林地，因此对土壤表层水分和温度的敏感性较高[27]。

本文也发现不同季节WUE变化趋势也存在差异，如春、夏季WUE整体以稳定不变趋势为主，秋季以增加趋势为主，且草地WUE下降速率最快，林地次之，耕地最慢。这可能是因为草地植被利用的水分大多来自于地表土壤水分，而林地植被可以利用中、深层土壤水分，因此草地植被对气候变化和人类扰动更加敏感[27]。有研究也发现，随着黄土高原地区“退耕还林(还草)”工程的实施，黄土高原绿度增加会引起地表反照率降低，ET增强，土壤含水量近几年呈降低趋势[28-30]。这就解释了不同土地利用类型区域WUE均呈降低趋势，且草地降低趋势大于林地和耕地。同样本文也发现，秋季WUE变化趋势呈现出“西北增加、东南减少”的分布特征，有研究显示气候变暖，秋季黄土高原降水量较之前有所增加(尤其在9—10月)，但西北部干旱、半干旱地区由于降水量增多和温度上升，会极大促进ET的增加进而导致WUE的下降，而东部地区则会受降水增多、气温提高的有利气候条件影响而提高植被光合作用，且GPP提高幅度大于ET提高幅度，从而有效促进WUE的显著提高[6,8]，以上原因均解释了黄土高原秋季WUE时空分布的异质性。

3.2 干旱和LST对WUE的贡献度分析

WUE变化是一个周期性、持续性的动态过程，变化的制约因素众多，各因素之间也存在一定的制约关系[27]。但与其他因素相比，干旱发生具有突发性、预测性和破坏性大等特点，因此可能会因为气候突变而严重影响陆地生态系统结构、组成和功能及区域陆地生态系统的碳循环，从而导致植被WUE发生显著变化[23]。因此，本文探究了不同季节、不同土地利用类型区域干旱(使用SPEI指数表示)和LST对WUE变化的贡献度，发现春、夏季LST升高均会使WUE增加，草地区域表现最为显著，秋季LST增加会使草地和林地区域WUE减小，但会导致耕地区域WUE增加。春、秋季干旱程度增加会导致WUE增加，而夏季干旱程度增加会使WUE减小。这一方面可能是因为春季大部分地区植被处于休眠期或返青期，植被覆盖度较低，同时部分地区仍有雪覆盖，因此LST升高可以增加土壤水分、使植被提前进入返青期或生长期，从而增加了WUE。另一方面也可能是因为春季黄土高原常受到风蚀影响，干旱增加不但会导致植被生长减缓、生物量减少，并且会增加植被死亡率，从而使土壤沙化严重、土壤水分和植被冠层水分的ET增加，使WUE降低[9,27]。随着干旱增强，土壤表层ET增大，地表干燥度增加，裸露在外的土壤在强烈的太阳辐射、风侵蚀下，植被根系抓地力下降，从而进一步导致WUE降低[16]。

然而，目前很多研究发现全球区域在气候暖干化背景下植被生长反而越来越好，Lian等也指出因为大气CO_2浓度升高导致植被叶片气孔导度降低，植物可用更少的水分换取等量的碳，从而大幅度降低了生态系统的水分需求，因此虽然大气水分亏缺加剧但植被却在变绿[31]，这也会导致WUE增加。在较为干旱的地区，植被因其具有较强的抗旱能力，干旱程度越高，WUE反而会增加，这可以解释在干旱和半干旱地区干旱与WUE为正关系[32]。从不同土地利用区域来看，草地根系较浅，只能从表层土壤中获取水分，在降雨时的储水能力较弱，因此具有较低的抗旱性，这使得草地植被对干旱具有较强的响应，对短时间的干旱敏感性强于长时间的干旱[27]。但耕地区域因人为干扰较多，如灌溉、施肥等农田管理措施为农作物提供了更好的生长条件，因此在耕地区域WUE对干旱的响应程度较小[27]。森林根系发达，具有较强的耐旱性，因此林地区域WUE对短时间的干旱响应并不明显。本文发现夏季干旱增加会导致黄土高原WUE下降，这可能与黄土高原夏季炎热多暴雨的天气会增加潜在蒸散量有关，且该地区全年降水量少和降水频率小，当夏季发生干旱

并经过一定时间的积累，植物没有充足土壤水分供给到植被碳的合成，导致区域绿度减小，植被叶片会萎缩，进而会导致土壤表层水分ET增加，因此夏季干旱会导致WUE减小[33]。夏季干旱会显著影响WUE也可能与黄土高原CO_2浓度增加以及东亚夏季风强度显著减弱有关。可见，在气候暖干化、人类活动增强和CO_2浓度增强背景下，揭示不同季节、不同土地利用区域WUE对季节性干旱和LST的响应规律，为生态环境保护政策制定提供科学依据。

4 结 论

（1）2001—2021年黄土高原春、秋季不同土地利用区域WUE平均值均小于2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}，夏季WUE平均值大于2.0 g C·m^{-2}·mm^{-1}。空间分布上，春季WUE多年平均值呈"西北、东南高，西南、东北低"的分布特征，夏季WUE多年平均值呈"北高南低"的分布特征，秋季WUE多年平均值呈"西北高、东南低"的空间分布特征。春、秋季在较为湿润的耕地和林地区域WUE高于草地区域，夏季耕地区域WUE最低，林地区域次之，草地区域最高。

（2）春、夏季WUE整体以稳定不变趋势为主，WUE变化趋势空间分布上均表现为"中部减少，西部和东部稳定不变"的分布特征，不同土地类型区域WUE均为减小，草地区域WUE下降速率>林地区域>耕地区域；秋季WUE整体以增加趋势为主，不同土地类型区域WUE均呈增加趋势，且草地区域WUE上升速率>林地区域>耕地区域，WUE变化趋势空间分布上呈"西北增加、东南减少"的分布特征

（3）春、夏季LST升高会使WUE增加，草地区域表现最为显著。秋季LST增加会使草地和林地区域WUE减小，但会导致耕地区域WUE增加。春、秋季干旱程度增加会导致WUE增加，而夏季干旱程度增加会使WUE减小。可见，干旱程度变化对WUE变化的贡献度显著大于LST。

这项研究表明黄土高原WUE易受到干旱的影响，因此后期亟需关注和模拟极端干旱条件下不同土地覆盖区域WUE变化特征，为未来区域植被容纳阈值的确定提供关键数据支持。

参考文献（References）

[1] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2016, 45(1): 223-243.

[2] 郜国明, 田世民, 曹永涛, 等. 黄河流域生态保护问题与对策探讨[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 126-130. [Gao Guoming, Tian Shimin, Cao Yongtao, et al. Discussion on the issues and countermeasures of ecological conservation of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2020, 42(9): 126-130.]

[3] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6: 1019-1022.

[4] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2015, 9(1): 38-41.

[5] Zheng H, Lin H, Zhu X J, et al. Divergent spatial responses of plant and ecosystem water-use efficiency to climate and vegetation gradients in the Chinese Loess Plateau[J]. Global and Planetary Change, 2019, 181: 102995, doi: 10.1016/j.gloplacha.2019.102995.

[6] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 等. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 119-125. [Pei Tingting, Li Xiaoyan, Wu Huawu, et al. Sensitivity of vegetation water use efficiency to climate and vegetation index in Loess Plateau, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 119-125.]

[7] 邵薇薇, 杨大文, 孙福宝, 等. 黄土高原地区植被与水循环的关系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(12): 1958-1962. [Shao Weiwei, Yang Dawen, Sun Fubao, et al. Relationship between vegetation cover and water balance in the Loess Plateaus[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology Edition), 2009, 49(12): 1958-1962.]

[8] 刘宪锋, 胡宝怡, 任志远. 黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素[J]. 中国农业科学, 2018, 51(2): 302-314. [Liu Xianfeng, Hu Baoyi, Ren Zhiyuan. Spatiotemporal variation of water use efficiency and its driving forces on the Loess Plateau during 2000—2014[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(2): 302-314.]

[9] 张良侠, 胡中民, 樊江文, 等. 区域尺度生态系统水分利用效率的时空变异特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 691-699. [Zhang Liangxia, Hu Zhongmin, Fan Jiangwen, et al. Advances in the spatiotemporal dynamics in ecosystem water use efficiency at regional scale[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 691-699.]

[10] 陈凌伟. 2001—2020年黄河流域水分利用效率时空变化及其对环境因素的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 222-230. [Chen Lingwei. Spatiotemporal variation of water use efficiency and its responses to environmental factors in Yellow River Basin during 2001—2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 222-230.]

[11] Deng Y, Wang X H, Wang K, et al. Responses of vegetation greenness and carbon cycle to extreme droughts in China[J]. Agricultur-

al and Forest Meteorology, 2021, 298-299: 108307, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108307.

[12] 卓静, 胡皓, 何慧娟, 等. 陕北黄土高原生态脆弱性时空变异及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1768-1777. [Zhou Jing, Hu Hao, He Huijuan, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of ecological vulnerability in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1768-1777.]

[13] Zheng H, Lin H, Zhou W J, et al. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000—2014 in the Chinese Loess Plateau: Evidence from satellite data[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 507-518.

[14] Jin N, Ren W, Tao B, et al. Effects of water stress on water use efficiency of irrigated and rainfed wheat in the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 1-11.

[15] Yang Y T, Guan H D, Batelaan O, et al. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems [J]. Scientific reports, 2016, 6: 23284, doi: 10.1038/srep23284.

[16] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO_2 on global river runoff trends[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(39): 15242-15247.

[17] Quan Q, Zhang F Y, Tian D S, et al. Transpiration dominates ecosystem water use efficiency in response to warming in an alpine meadow[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2018, 123: 453-466.

[18] Jongen M, Pereira J S, Aires L M J, et al. The effects of drought and time of precipitation on the inter-annual variation in ecosystem- atmosphere exchange in a Mediterranean grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 595-606.

[19] Scurlock J M O, Cramer W, Olson R J, et al. Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation[J]. Ecological Applications, 1999, 9(3): 913-919.

[20] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 115(8): 1781-1800.

[21] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13: 3907-3925.

[22] 张永瑞, 张岳军, 靳泽辉, 等. 基于SPEI指数的黄土高原夏季干旱时空特征分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1322-1331. [Zhang Yongrui, Zhang Yuejun, Jin Zehui, et al. The temporal and spatial characteristics of summer drought in the Loess Plateau based on SPEI[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28 (7): 1322-1331.]

[23] Sen P. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63: 1379-1389.

[24] 刘佳琪, 周璐红, 席小雅. 2000—2020年黄河流域土地生态质量及其变化趋势预测[J]. 干旱区地理, 2023, 46(10): 1654-1662. [Liu Jiaqi, Zhou Luhong, Xi Xiaoya. Land ecological quality and its change trend prediction in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(10): 1654-1662.]

[25] Zhang T, Huang Y. Estimating the impacts of warming trends on wheat and maize in China from 1980 to 2008 based on county level data[J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(3): 699-708.

[26] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. Global and Planetary Change, 2013, 101: 119-128.

[27] Zhang T, Peng J, Liang W, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000—2010[J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 105-122.

[28] Yan S, Piao S L, Huang M T, et al. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models[J]. Global Ecology and Biogeography, 2016, 25(3): 311-323.

[29] Gao Y, Zhu X J, Yu G R, et al. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 195-196: 32-37.

[30] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, et al. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought[J]. Scientific Report, 2015, 5: 13799, doi: 10.1038/srep13799.

[31] Lian X, Piao S L, Chen A P, et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2: 232-250.

[32] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 2010, 329: 940-943.

[33] Hu Z, Yu G, Wang Q, et al. Ecosystem level water use efficiency: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498-1507.

Dynamics of water use efficiency and its response to drought and land surface temperature on the Loess Plateau

QIN Gexia[1,2], MENG Zhiyuan[3], LI Ni[4]

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Institute of Earth Surface System and Hazards, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. Xi'an Dongfang Hongye Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China; 4. School of Economics and Management, Shaanxi Xueqian Normal University, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: The spatiotemporal variations of water use efficiency (WUE) and its relationship with drought and land surface temperature (LST) on the Loess Plateau are crucial for assessing the maximum vegetation carrying capacity in this region, known as the most severely eroded area globally and the largest greening area in China. This study employed Theil-Sen trend analysis and the first-order differencing relative contribution method to examine the spatiotemporal changes in WUE across different seasons on the Loess Plateau from 2001 to 2021 and to evaluate the contributions of drought and LST to these changes. The results reveal that: (1) The average WUE values in spring and autumn are below 2.0 g $C\cdot m^{-2}\cdot mm^{-1}$, while in summer, the average WUE exceeds 2.0 g $C\cdot m^{-2}\cdot mm^{-1}$. In spring and autumn, WUE is higher in cultivated land and forest areas compared to grassland areas, whereas in summer, WUE is lowest in cultivated land, followed by forest areas, and highest in grassland. (2) WUE remains stable in spring and summer, displaying a spatial distribution of "reduction in the central part, stability in the western and eastern parts." The rate of decline in WUE is greater in grassland areas than in forest and cultivated land areas. In autumn, WUE shows an increasing trend, with a higher rate of increase observed in grassland areas than in forest and cultivated land areas, exhibiting a spatial pattern of "increase in the northwest, decrease in the southeast." (3) In spring and summer, LST positively contributes to WUE changes, with the most significant impacts in grassland areas. In autumn, LST negatively affects WUE in grassland and forest areas but positively influences WUE in cultivated land areas. Drought positively contributes to WUE changes in spring and autumn, while it negatively affects WUE in summer. These findings enhance the understanding of the interactions between drought, LST, and water resources in the context of climate change and ecological restoration efforts on the Loess Plateau.

Key words: water use efficiency; drought; land surface temperature; Loess Plateau